제주관측지점에서 폭염의 장기간 변화 특성

최재원 · 차유미 · 임병환 · 박철홍

국립기상과학원

(2015년 11월 26일 접수, 2015년 12월 28일 수정, 2015년 12월 29일 게재 확정)

Characteristics of long-term change in heatwave days in Jeju

Jae-Won Choi · Yumi Cha · Byunghwan Lim · Cheol-Hong Park

National Institute of Meteorological Sciences

(Received 26 November 2015, Revised 28 December 2015, Accepted 29 December 2015)

Abstract : This study analyzed the frequency of heatwave occurrences in Jeju Island in summer season (June to September) for the recent 46 years (1968-2013). The frequency showed an increasing trend up until now and we applied statistical change-point analysis in order to determine whether this increasing trend had a climate regime shift. As a result, it was discovered that frequency of heatwave occurrences has rapidly increased since 1990. Thus, to determine the causes of rapid increase in frequency of heatwave occurrences in Jeju Island since 1990, a difference in mean values of June to September between a period of 1990-2013 and a period of 1968-1989 was analyzed. The analysis result of differences between two periods about stream flows showed that large anomalous anticyclonic circulations were strengthened in the subtropical western Pacific and the center of the small anomalous anticyclone, which was branched westwardly out of the anticyclonic circulations was located within the southern part of the Korean Peninsula. This strengthening of the anomalous anticyclone in the Korean Peninsula was also shown at the middle and upper troposphere. The anomalous anticyclonic circulations, which were expanded to the Korean Peninsula from the subtropical western Pacific in recent years was due to strengthening of the western North Pacific subtropical high (WNPSH) in the Korean Peninsula. Hot and humid air can be introduced into the Korean Peninsula due to the strengthening WNPSH in the Korean Peninsula. Furthermore, a difference in daily maximum temperature at 2m height as well as sensible heat net flux between two periods were analyzed in order to determine the degree of the heat at the ground. There was positive anomalies found along the coast in East Asia and the center of the positive anomalies was linked to the Korean Peninsula via the northern part of China. Thus, the Korean Peninsula including Jeju area had more heat than usual in recent years.

Key Words : Heatwave, Jeju, statistical change-point analysis, climate regime shift, western North Pacific subtropical high

주요어 : 폭염, 제주, 통계적시점변화분석, 기후레짐이동, 북서태평양 아열대고기압

1. 도입

전 지구의 평균 기온이 상승하고 있으며 그 편차도 커져 기상재해의 빈도와 강도가 증가하고 있다(Frich *et al.*, 2002; Alexander *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2009). 이와 더불어 전세계적으로 일 최저기온 및 일 최고기온의 증가가 뚜렷하게 나타나고 있다(Moberg and Jones, 2005; Roveson, 2004). 이러한 현상은 동아시아 영역에 포함된 한반도에서 일어나고 있으며(Hulme *et al.*, 1994), 한반도에서도 평균 기온이 상승했다는 연구(Lee and Kang, 1997; Ha *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2014)와 극한기온의 빈도가 증가한다는 연구(Choi *et al.*, 2007; Heo and Kwon, 2007)가 뒷받침 해주고 있다. 이러한 연구결과에 따르면, 폭염과 열대야일수도 증가할 것이라는 결과를 내놓았다. 한반도의 폭염일이 증가한다는 연구(Park *et al.*, 2008a; Park *et al.*, 2013)와 열대야가 증가한다는 연구(Choi and Kwon, 2005; Heo and Kwon, 2007; Park and Suh, 2011)도 있다.

석탄과 석유 등 화석연료의 연소에 의한 온실가스의 대기 중 농도 증가 등으로 인하여 지구의 기온이 점차 상승함에 따라 가뭄, 호우, 폭설 등 다양한 이상기상 현상이 빈번하게 발생하고 있다. 지구촌 곳곳에서 강수의 발생빈도와 강도가 예전에 비해 달라지는 등 전 지구적인 수문학적 순환이 달라짐에 따라 어떤 곳에서는 호우가 발생하는가 하면, 어떤 곳에서는 심한 가뭄으로 물 부족을 겪기도 한다(Campbell-Lendrum *et al.*, 2002; Casarido *et al.*, 2007). 오랜 기간 동안 지속되는 가뭄은 심한 폭염을 유발함으로써 자연생태계뿐만 아니라 인류의 보건에도 심각한 영향을 초래할 수 있다(Choi *et al.*, 2005; Choi, 2006; Ferranti and Viterbo, 2006; Kim *et al.*, 2006). 2003년 여름철 유럽에서 발생한 심한 가뭄과 폭염은 엄청난 사회

적, 경제적, 환경적 영향을 초래하였다(Stott *et al.*, 2004). 2003년 유럽 폭염과 관련해서는 지구 온난화와와의 관련성(Beniston, 2004; Schar *et al.*, 2004; Stott *et al.*, 2004; Trigo *et al.*, 2005)과 기상학적 원인 등에 관한 다수의 연구가 수행되었다(Black *et al.*, 2004; Fink *et al.*, 2004; Fischer *et al.*, 2007). 2003년 유럽 폭염으로 인한 사망자는 노약자를 포함하여 약 3만 5천명에 이르고, 산불에 의하여 넓은 면적의 산림이 파괴되었으며, 수중 생태계와 빙하에도 많은 영향이 나타났다. 또한 전력 중단, 운송 계약, 농업 생산성 감소 등 경제적 피해액이 130억 유로에 달한 것으로 보고되었다(Ross and Lott, 2003).

우리나라의 경우 2011년 9월 15일에 발생한 폭염으로 인해 일시적인 순환 정전으로 접수된 피해신고는 9,083건, 피해액은 628억원에 달했다(Korea Claim Adjuster Association, 2011). 폭염에 의한 인명피해는 더욱 심각하다. Kim *et al.*(2014)의 연구에 따르면, 서울에서는 기온의 90분위수에 해당하는 29.9℃보다 1℃ 상승할 때마다 사망자수가 3% 증가함을 밝혔다. 또한 서남아시아에서 2015년 한해 동안 발생한 인도와 파키스탄의 폭염으로 인한 사망자수가 각각 2,005명, 1,300명으로 조사되었다. 이는 1990~2014년 극한기온으로 인한 사망자수 순위 중 10위권 안에 들어가는 숫자이다(Disaster Profiles, 2015). 우리나라에서도 1994년에 발생한 폭염(33일 지속)으로 직접적 영향뿐만 아니라 간접적 영향까지 포함하여 3,027명이 사망하였다(Heo and Song, 2012).

폭염에 관한 연구로서 Park *et al.*(2008b)은 서울 지역에서 폭염이 발생하는 기간 동안 일 최고기온과 일 최고열지수가 일 사망자수와 유의한 지연상관을 보임으로써 폭염발생이 일 사망자수 발생에 영향을 미친다는 결과를 제시하고 있다. 기상청에서 실시하고 있는 폭염특보제 또한 하계기간 동안

일별 초과사망자수의 발생분포를 근거로 특정 임계치를 초과하는 시점의 일 최고기온과 일 최고열지수를 기준으로 설정하는 등 인간의 건강에 미치는 영향을 고려하여 예보하고 있다. 따라서 여름철의 극단적 고온현상(즉, 폭염 혹은 열파)은 온대·한대 지역에서 일 사망률의 증가와 많은 연관성이 있는 것으로 알려져 있다(Kalkstein, 1991; Kalkstein *et al.*, 1996; WHO, 2003; Kysely and Huth, 2004; Pascal *et al.*, 2006). 그 대표적 사례로 2003년 유럽지역에서 발생한 여름철 폭염을 들 수 있는데(Stott *et al.*, 2004; UNEP, 2004), 프랑스의 경우 2003년 8월 1일부터 20일까지의 이상고온 기간 동안 약 15,000명 정도의 초과 사망자가 발생한 것으로 보고된 바 있으며, 2003년 여름은 프랑스의 관측 역사상 가장 무더웠던 것으로 기록되고 있다(Pascal *et al.*, 2006). 또한 이탈리아 로마에서는 여름철 3개월 동안 약 1,094명이 초과 사망하였고(23%의 사망자 수 증가), 영국 잉글랜드에서는 8월 11일 하루 동안 370명이 폭염으로 초과 사망하는 등(42% 사망자 수 증가)의 인명 피해 사례가 보고된 바 있다(Michelozzi *et al.*, 2004). 미국에서는 1995년 시카고 폭염 때 700명이 초과 사망한 사례가 보고된 바 있다. 또한 2006년 7월 하순에도 미국 중남부 및 유럽일대에서의 기록적인 폭염사례와 그에 따른 인명피해가 계속적으로 보고되고 있다.

위에서 언급한 바와 같이 폭염은 다른 자연재해와는 달리 시설물에 의한 파괴는 없지만 많은 인명피해를 야기하는 등 피해대상이 광범위한 특징을 가지고 있다. 지구온난화 등 전지구적 기후 변화에 대한 기후예측모델 결과에 따르면, 폭염 등 극단적인 기상현상의 강도와 빈도는 지속적인 증가추세를 보일 것으로 예상되기 때문에 이에 대한 대비책 마련이 필요하다. 이러한 의미에서 본 연구는 제주 관측지점에서 폭염의 장기변동성을 분석

하고 그 원인을 파악하여 제주 지역의 폭염대책에 필요한 근거를 제공함을 목적으로 한다.

2. 자료 및 분석방법

1) 자료

이 연구는 1968~2013년(46년) 동안 우리나라 제주 관측지점(33.51°N, 126.53°E)에서 관측된 폭염관측일수의 자료를 한국 기상청(Korea Meteorological Administration)으로부터 제공받아 사용하였다. 제주지역 중 제주시의 자료가 가장 장기간의 자료로 구축되어 있기 때문이다.

또한 이 연구는 미국 국립환경예측센터-국립 대기과학연구센터(National Center for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research, NCEP-NCAR)에서 제공하는 다음과 같은 변수를 가진 재분석 자료를 사용하였다(Kalnay *et al.*, 1996; Kistler *et al.*, 2001): 지위고도(gpm), 수평바람(ms^{-1}), 기온($^{\circ}\text{C}$), 상대습도(%), 전운량(%), 현열(Wm^{-2}), 속도포텐셜($\text{m}^2\text{s}^{-1}10^{-6}$). 이 자료는 위·경도 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 및 연직 17층(상대습도는 8층)의 공간해상도로 구성되어 있다. 이 자료들은 1948년부터 현재까지 사용 가능하다. 위의 재분석 자료들은 모두 NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center¹⁾(CDC)에서 이용 가능하다.

태풍자료는 지역특별기상센터-동경 태풍센터(Regional Specialized Meteorological Center (RSMC)-Tokyo Typhoon Center)에서 제공하는 태풍의 최적경로(best-track) 자료로부터 획득되었다. 이 자료는 1968~2013년 동안 매 6시간 간격으로 관측된 태풍 이름, 위경도 위치, 중심기압, 중심 최대풍속의 정보로 구성된다. 태풍은 일반적으로 중심 최대풍속을 기준으로 네 등급으로 나뉘어진

다: 열대 저압부(Tropical Depression, 중심최대풍속 $< 17\text{ms}^{-1}$), 열대폭풍(Tropical Storm, $17\text{ms}^{-1} \leq$ 중심최대풍속 $\leq 24\text{ms}^{-1}$), 격렬한 열대폭풍(Severe Tropical Storm, $25\text{ms}^{-1} \leq$ 중심최대풍속 $\leq 32\text{ms}^{-1}$), 태풍(Typhoon, 중심최대풍속 $\geq 33\text{ms}^{-1}$). 위의 네 등급에 더하여 이 연구에서는 태풍으로부터 변형된 온대저기압(extratropical cyclone)도 분석에 포함시켰다. 이는 이러한 온대 저기압도 동아시아 중위도 지역에서 많은 재산과 인명피해를 입히기 때문이다. 이 연구에서 태풍은 이 다섯 등급을 모두 포함하는 것으로 정의된다.

2) 분석방법

이 연구에서 두 평균 사이의 유의성 비교는 독립 표본 t-검정(independent two-sample t-test)을 사용하였다. 두 독립변수의 시계열이 t-분포를 따르고, 표본의 평균이 각각 $\bar{x}_1$, $\bar{x}_2$ 로 정의될 경우, t-test의 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_{x1x2} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

여기서 S_{x1} , S_{x2} 는 표준편차이고 n_1 , n_2 는 두 시계열에서 총 개수이다. 만약 위의 식으로부터 t의 절대값이 유의수준의 문턱값보다 크게 산출되면, 귀무가설(null hypothesis)은 $\alpha(\times 100)\%$ 의 신뢰수준에서 기각되어 낮은 신뢰수준을 보이며, 기각되지 않으면 높은 신뢰 수준을 보이는 것으로 정의된다(Wilks, 1995).

또한 본 연구에서 주어진 시계열에 대해 통계적 시점변화 분석(statistical change-point analysis)이 적용되었다. 이 분석 방법을 적용하게 되면 t값이 산출되는데 t의 절대값이 가장 큰 해에 기후레짐이동이 존재한다는 것을 의미한다. 이 분석에 대한 좀 더 자세한 내용은 Elsner *et al.*(2000),

Chu(2002), Ho *et al.*(2004)의 연구를 참고하기 바란다.

본 연구에서 폭염은 일 최고기온이 33°C 이상인 상태가 2일 이상 지속될 때를 의미한다. 또한 제주 관측지점에서 폭염발생빈도의 증가추세 원인을 파악하기 위해 6~9월 동안 대기환경에 대한 종관상태를 분석하였다.

3. 제주 관측지점에서의 폭염 발생빈도 시계열 분석

Figure 1a는 최근 46년 동안 제주 관측지점에서의 폭염발생빈도의 시계열을 나타낸다(막대그래프). 폭염발생빈도는 최근까지 증가하는 하는 경향을 나타내고 있으며, 이 증가경향은 95% 신뢰수준에서 유의하다(굵은 실선). 한편 이 시계열에서 기후레짐이동이 존재하는지를 알아보기 통계학적 시점변화분석을 이 시계열에 적용하였다(점선). 그 결과 1990년에 가장 큰 t값이 존재하였다. 따라서 46년의 분석기간은 1968~1989년의 소빈도 기간(파란색)과 1990~2013년의 다빈도 기간(붉은색)으로 구분될 수 있었다. 제주 관측지점에서 46년 기후학적 평균 폭염발생빈도는 5.7회(파선)로서 1968~1989년의 기간에는 단 두 해(1971, 1977년)만이 기후학적 평균빈도를 넘은 반면, 1990~2013년의 기간에는 단 8년(1993년, 1997년, 1999년, 2000년, 2002년, 2003년, 2008년, 2012년)만이 이 기후학적 평균빈도를 넘지 못했다. 따라서 1968~1989년 기간의 평균 폭염발생빈도는 3.4회이며, 1990~2013년 기간 동안에는 7.9회로 최근 기간에 폭염발생빈도가 과거기간보다 4.5일 더 많다. 두 기간 사이에 평균 폭염발생빈도 차는 99% 신뢰수준에서 유의하다.

한편 폭염발생에 있어 흐린날은 태양열을 차단

하여 폭염발생빈도를 줄일 수 있다. 따라서 최근 46년 동안 6~9월에 흐린날의 빈도를 분석하였다 (Figure 1b, 막대그래프). 여기서 6~9월을 선택한 이유는 제주 관측지점에서 폭염이 주로 6~9월 동안 발생하기 때문이다. 그리고 흐린날은 상, 중, 하층운에 의해 하늘이 완전히 덮힌날로 정의된다. 제주 관측지점에서의 흐린날의 빈도는 최근까지 감소하는 경향을 나타내고 있으며(굵은 실선), 이 감소경향은 90% 신뢰수준에서 유의하다. 이는 제주 관측지점에서 폭염발생빈도와 정반대의 경향을 나타내며, 흐린날에는 구름에 의해 태양열이 차단되어 폭염발생가능성이 낮아짐을 의미한다. 하지만 폭염발생빈도 시계열과의 상관은 -0.32 로 통계적으로 유의하지 않다. 한편 흐린날의 빈도 시계열에서 기후레짐이동이 존재하는지 알아보기 위해 이 시계열에 통계적 시점변화분석이 적용되었

다(점선). 그 결과 폭염발생빈도의 결과와 유사하게 1990년에 가장 큰 t 값이 존재하였다. 따라서 46년의 분석기간은 1968~1989년의 다빈도 기간(파란색)과 1990~2013년의 소빈도 기간(붉은색)으로 나뉘어 질 수 있다. 이는 앞서 설명하였듯이 흐린날이 폭염발생경향에 영향을 미친다는 것을 나타낸다. 제주 관측지점에서 46년 기후학적 평균 흐린날의 빈도는 15.2일로(파선) 1968~1989년 기간 동안에는 단 7년(1968년, 1969년, 1973년, 1975년, 1978년, 1982년, 1987년)만이 기후학적 평균빈도를 넘지 못한 반면, 1990~2013년 기간 동안에는 (1991년, 1994년, 1996년, 1998년, 1999년, 2000년, 2007년, 2008년, 2012년, 2013년) 10년만이 기후학적 평균빈도를 넘었다. 따라서 1968~1989년 기간의 평균 흐린날의 빈도는 17.2일이며, 1990~2013년 기간 동안에는 13.7일로 최근 기간에 흐

Figure 1. Time series (bar graph) of (a) heat wave days and (b) cloudy days for June-September in Jeju and t -value through statistical change-point analysis (dotted line).

린날의 빈도가 과거 기간보다 3.5일 적다. 두 기간 사이에 평균 흐린날의 빈도차는 90% 신뢰수준에서 유의하다.

따라서 이후 분석에서는 최근에 제주 관측지점에서 폭염발생빈도가 증가한 원인을 알아보기 위해 중관환경에 대해 6~9월 동안 1990~2013년 평균과 1968~1989년 평균 사이의 차를 분석한다.

4. 1990~2013년 평균과 1968~1989년 평균 사이에 중관변수의 차

최근에 제주 관측지점에서 폭염발생빈도가 증가한 원인을 알아보기 위해 850hPa, 500hPa, 200hPa 유선에 대해 두 기간 사이에 차를 분석하였다(Figure 2). 먼저 850hPa 유선에서 아열대 서태평양과 동아시아 대륙에서는 고기압성 순환 아노말리가 강화되어 있다(Figure 2a). 특히 아열대 서태평양에서 북서쪽으로 뻗어 나온 작은 고기압 중심이 제주 관측지점 부근에 위치해 있다. 또한 열대서태평양에서 북상하는 덥고 습한 남풍의 아노말리가 제주 관측지점으로 향하고 있다. 따라서 제주 관측지점은 맑은 동시에 덥고 습한 날씨가 강화될 수 있는 좋은 환경이 형성되어 있음을 알 수 있다.

500hPa 유선에서도 아열대 서태평양에 거대한 고기압성 순환 아노말리가 형성되어 있다(Figure 2b). 또한 동아시아 대륙에도 고기압성 순환이 강화되어 있다. 동아시아 대륙에서 한반도로 뻗어 나온 고기압 중심이 한반도의 남부지역에 위치해 있다. 따라서 한반도는 대륙권 하층에서뿐만 아니라 대륙권 중층에서도 고기압 아노말리가 강화됨으로써 맑은 날씨를 유지할 수 있는 좋은 환경이 형성되어 있다.

200hPa 유선에서 아열대 서태평양에는 거대한

Figure 2. Differences in (a) 850 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 200 hPa stream flows between 1990-2013 and 1968-1989. Shaded areas are significant at the 95% confidence level.

Figure 3. Distribution of western North Pacific subtropical highs (WNPSHs) in 1990-2013 (solid line) and 1968-1989 (dashed line). Here, the WNPSH is defined as area that is greater than 5,875gpm at 500 hPa level.

저기압성 순환 아노말리가 강화되어 있다(Figure 2c). 이 지역의 대류권 하중층에서는 고기압성 순환 아노말리를 보였기 때문에, 이 지역에서는 대류권 상층에서 공기가 수렴하여 하층에서 발산하는 대기구조가 형성되어 있음을 알 수 있다. 한편 중국북부지역으로부터 일본 동쪽해상으로 고기압성 순환 아노말리가 형성되어 있으며, 그 중심은 한반도 북부지역에 위치해 있다. 따라서 제주 관측지점을 포함한 한반도는 대류권 전 층에서 고기압성 순환 아노말리가 강화되어 있다.

한반도 부근지역에서 고기압성 순환 아노말리가 최근에 강화되었다는 것은 북서태평양 고기압이 한반도 부근으로 좀 더 확장해져 있음을 의미할 수 있다. 따라서 이 연구는 두 기간에 대해 북서태평양 고기압의 발달 정도를 분석하였다(Figure 3). 여기서 북서태평양 고기압은 500hPa에서 5,875gpm보다 큰 값을 갖는 영역으로 정의된다. 1990~2013년 기간 평균의 북태평양 고기압(실선)이 1968~1989년 기간 평균의 북태평양 고기압보다 한반도를 향해 북쪽으로 확장되어 있음을 볼 수

있다. 따라서 최근에 북서태평양 고기압이 한반도로 더욱 확장함으로써 이 고기압의 서쪽연변을 따라 제주 관측지점으로 덥고 습한 공기를 공급하여 제주 관측지점에는 최근에 폭염이 발생할 가능성이 높음을 알 수 있다.

실제로 최근에 제주 관측지점이 더 더워졌는지를 알아보기 위해 850hPa, 500hPa, 200hPa 기온에 대해 두 기간 사이에 차가 분석되었다(Figure 4). 먼저 850hPa에서는 분석영역의 일부 지역을 제외한 모든 지역에서 양의 아노말리를 나타낸다(Figure 4a). 특히, 양의 아노말리의 중심은 중국 중부지역으로부터 한반도로 이어진다. 따라서 최근에 제주 관측지점을 포함한 한반도는 더 더워졌음을 알 수 있다.

500hPa에서도 아열대 서태평양 일부 지역을 제외한 대부분의 지역에서 양의 아노말리를 나타낸다(Figure 4b). 특히 양의 아노말리 중심은 중국 북부지역으로부터 한반도 북부지역에 위치해 있다. 이는 북서태평양 고기압이 한반도를 향해 발달함으로써 덥고 습한 공기를 한반도에 공급했기 때문

Figure 4. Same as in Figure 2, but for (a) 850 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 200 hPa air temperatures. Contour interval is 0.2°C. Shaded areas are significant at the 95% confidence level.

Figure 5. Same as in Figure 2, but for (a) 850 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 200 hPa relative humidities. Contour interval is 1%. Shaded areas are significant at the 95% confidence level.

Figure 6. Same as in Figure 2, but for total cloud cover. Contour interval is 1%. Shaded areas denote positive values.

이다.

200hPa에서도 한반도는 양의 아노말리에 위치해 있다(Figure 4c). 따라서 제주 관측지점을 포함한 한반도는 대류권 전 층에서 최근에 더 더워졌음을 알 수 있다.

한편 최근에 제주 관측지점이 더 습해졌는지를 알아보기 위해 850hPa, 500hPa, 300hPa 상대습도에 대해 두 기간 사이에 차를 분석하였다(Figure 5). 먼저 850hPa에서 일부 지역을 제외하고 분석 영역의 대부분의 지역에서 양의 아노말리를 나타낸다. 특히 한반도 남부지역에 양의 아노말리의 중심이 위치해 있다. 따라서 한반도는 최근에 더 더워졌을 뿐만 아니라 더 습해져 폭염이 발생할 가능성이 높아졌음을 알 수 있다.

500hPa에서도 역시 일부 지역을 제외하고 분석 영역의 대부분의 지역에서 양의 아노말리를 나타낸다(Figure 5b). 특히 95% 신뢰수준에서 유의한 지역은 북서태평양 고기압 연변을 따라 대략 위치해 있음을 볼 수 있다. 또한 양의 아노말리의 중심이 중국 중부지역으로부터 한반도 남부지역을 지나 일본 남서쪽 지역으로 이어져 있다. 이러한 양

의 아노말리의 공간분포는 최근 북서태평양 고기압의 북쪽으로의 발달로 인해 제주 관측지점을 포함한 한반도에 덥고 습한 공기가 공급되었기 때문이다.

200hPa에서도 분석영역의 대부분의 지역에서 양의 아노말리를 나타낸다(Figure 5c). 특히, 95% 신뢰수준에서 유의한 지역이 열대 및 아열대 서태평양으로부터 한반도를 향해 북쪽으로 향하고 있다. 이는 열대 지역의 덥고 습한 공기가 한반도로 유입되고 있음을 의미한다. 따라서 제주 관측지점을 포함한 한반도는 대류권 전 층에서 최근에 더 습해졌음을 알 수 있다.

실제로 최근에 맑은 날씨가 더 많았는지를 알아보기 위해 전운량에 대해 두 기간 사이에 차이를 분석하였다(Figure 6). 열대 및 아열대 서태평양과 베트남으로부터 중국을 지나 한반도를 거쳐 동시베리아 지역까지 남서에서 북동방향으로 음의 아노말리를 나타낸다. 이는 이들 지역에서 최근에 전운량이 감소하였음을 의미한다. 이는 앞서 분석되었듯이 최근에 맑은 날이 더 많았다는 결과와 연결될 수 있다. 따라서 제주 관측지점에서는 최근

에 맑은날이 더 많음으로 폭염이 발생할 가능성이 높아졌음을 알 수 있다.

한편 지표면에서 열기의 정도를 알아보기 위해 현열과 2m 높이에서의 일 최대 기온에 대해 두 기간 사이에 차를 분석하였다(Figure 7). 먼저 현열에서 동아시아 대륙에서는 음의 아노말리가 탁월한 반면, 동아시아 해안에서는 양의 아노말리가 탁월하다(Figure 7a). 특히 양의 아노말리의 중심은 중국 남중부지역으로부터 한반도를 향해 남서에서 북동방향으로 위치해 있다. 따라서 제주 관측지점을 포함한 한반도는 최근에 더움을 더 느낄 수 있음을 알 수 있다.

2m 높이에서의 일 최대 기온에서 양의 아노말리는 동아시아 해안에 위치해 있음을 볼 수 있다(Figure 7b). 특히 양의 아노말리의 중심은 중국 북부지역으로부터 한반도를 지나 동해에 위치해 있다. 따라서 인간이 체감할 수 있는 높이인 2m에서의 일 최대 기온에서도 최근에 제주 관측지점을 포함한 한반도에서 더 더움을 느낄 수 있다.

제주는 한반도에 영향을 주는 태풍의 길목에 위치해 있으며, 따라서 태풍으로부터 발생하는 비바람에 의해 폭염이 일시적으로 누그러질 수 있다. 따라서 이 연구는 태풍의 이동빈도에 대해 두 기간 사이에 차를 분석하였다(Figure 8). 1968~1989년 기간에는 주로 3가지의 경로를 나타낸다: 1) 열대 서태평양으로부터 필리핀을 지나 중국 남부지역을 향해 서쪽으로 이동하는 패턴. 2) 열대 서태평양으로부터 동중국해를 지나 한반도로 북상하는 패턴. 3) 열대 서태평양으로부터 일본 먼 동쪽해상으로 북상하는 패턴. 따라서 한반도는 최근에 태풍의 영향 빈도가 감소하여 폭염을 식혀줄 가능성이 낮음을 알 수 있다.

전구규모 순환을 알아보기 위해 속도 포텐셜과 발산 바람에 대해 두 기간 사이에 차를 분석하였다(Figure 9). 먼저 850hPa에서 적도 중앙태평양에

Figure 7. Same as in Figure 2, but for (a) sensible heat net flux (SHTFL) and (b) 2m max air temperature. Contour intervals are 2 Wm^{-2} for SHTFL and 0.2°C for 2m max air temperature. Shaded areas are positive values.

강한 발산의 중심이 형성되어 있다(Figure 9a). 이 발산된 공기는 120°E 의 서쪽지역과 북아메리카 서쪽 해안에서 수렴한다. 한편 한반도는 발산구역에 위치해 있다.

200hPa에서의 공간분포는 850hPa의 공간분포와 정반대를 나타낸다(Figure 9b). 적도 중앙태평양에 강한 수렴이 위치해 있으며, 120°E 의 서쪽지역과 북아메리카 서쪽 해안에서 발산을 나타낸다. 한반도는 수렴구역에 위치해 있다. 이러한 대류권

Figure 8. Differences in the mean TC passage frequencies between 1990-2013 and 1968-1989 for June-September within each $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ latitude-longitude grid box. Small solid rectangles indicate that the differences are significant at the 95% confidence level.

(a) 850 hPa velocity potential and divergent wind

(b) 200 hPa velocity potential and divergent wind

Figure 9. Same as in Figure 2, but for (a) 850 hPa velocity potential and divergent wind) and (b) 200 hPa velocity potential and divergent wind. Shaded areas denote negative anomalies. Contour interval is $3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} 10^{-6}$.

상하층에서의 속도 포텐셜의 특징은 한반도를 포함한 적도 중앙태평양의 대류권 상층에서 수렴한 공기가 하층에서 발산하는 고기압에 대한 순환의 특성을 나타냄을 알 수 있다. 이는 최근에 한반도를 향해 북서태평양 고기압의 발달과 연관된다.

5. 요약 및 결론

이 연구는 최근 46년(1968~2013년) 여름(6~9월) 동안 제주 관측지점에서의 폭염발생빈도를 분석하였다. 그 빈도는 최근까지 증가하는 경향을 나타내었으며, 이 증가경향에 기후레짐이동이 존재하는지를 알아보기 위해 통계적 시점변화 분석이 적용되었다. 그 결과 1990년 이후로 폭염발생빈도가 급격하게 증가하는 경향이 발견되었다. 또한 제주 관측지점에서의 흐린날의 빈도에 대해서도 통계적 시점 변화 분석이 적용되어 1990년 이후로 그 빈도가 급격하게 감소함이 분석되었다. 즉 1990년 이후로 맑은 날씨가 많아 제주 관측지점에서 폭염발생빈도가 증가하였음을 알 수 있었다. 따라서 1990년 이후로 제주 관측지점에서 폭염발생빈도가 급격하게 증가한 종관적 원인을 알아보기 위해 6~9월에 대해 1990~2013년 기간의 평균과 1968~1989년 기간의 평균 사이에 차를 분석하였다.

유선분석에 대한 두 기간 사이에 차의 분석결과에서는 아열대 서태평양에 거대한 고기압성 순환 아노말리가 강화되어 있었으며, 이 고기압성 순환으로부터 서쪽으로 뻗어 나온 작은 고기압 중심이 한반도 남부지역에 위치해 있었다. 이러한 한반도에서의 고기압의 강화는 대류권 중상층에서도 같은 현상으로 나타났다. 이렇게 최근에 아열대 서태평양에서 한반도로 확장한 고기압성 순환 아노말리는 북서태평양 고기압이 한반도 확장

한 결과 때문이었다. 한반도로 확장한 북서태평양 고기압으로 인해 한반도로 덥고 습한 공기가 유입될 수 있었다. 이는 대류권 하중상층에서 기온과 상대습도에 대해 1990~2013년 기간의 평균과 1968~1989년 기간의 평균 사이에 차의 분석을 통해 확인되었다.

또한 실제로 최근에 맑은 날씨가 더 많았는지를 알아보기 위해 전운량에 대해 두 기간 사이에 차를 분석하였다. 열대 및 아열대 서태평양과 베트남으로부터 중국을 지나 한반도를 거쳐 동시베리아 지역까지 남서에서 북동방향으로 음의 아노말리를 나타내었다. 이는 이들 지역에서 최근에 전운량이 감소하였음을 의미하였으며, 앞서 분석되었듯이 최근에 맑은 날이 더 많았다는 결과와 연결될 수 있었다. 따라서 제주 관측지점에서는 최근에 맑은 날이 더 많음으로 폭염이 발생할 가능성이 높아졌음을 알 수 있었다.

한편 지표면에서 열기의 정도를 알아보기 위해 현열과 2m 높이에서의 일 최대 기온에 대해 두 기간 사이에 차를 분석하였다. 동아시아 해안을 따라 양의 아노말리가 존재하였으며, 양의 아노말리의 중심은 중국 북부지역으로부터 한반도로 이어져 있었다. 따라서 제주 관측지점을 포함한 한반도는 최근에 더움을 더 느낄 수 있음을 알 수 있었다. 한반도에 영향을 주는 태풍 역시 최근에 더 감소함에 따라 폭염을 식혀줄 가능성이 더욱 낮아졌다.

전구규모의 대기순환에서는 최근에 한반도를 포함한 적도 중앙태평양의 상층에서 공기가 수렴하여 하층에서 발산하는 대기순환 아노말리가 발달하였다. 이는 고기압성 순환의 특징으로서 최근에 북서태평양 고기압이 한반도를 향해 발달한 결과와 연관되었다.

사사

본 연구는 국립기상과학원 주요사업 “예보기술
지원활용연구”의 지원으로 수행되었습니다.

주

1) <http://www.cdc.noaa.gov/Datasets>

참고문헌

- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D. B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M., and Vazquez-Aguirre, J. L., 2006, Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111: D05109 DOI: 10.1029/2005JD006290.
- Beniston, M., 2004, The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations, *Geophysical Research Letters*, 31, L02202, doi:10.1029/2003GL018857.
- Black, E., Blackburn, M., Harison, G., Hoskins, B., and Methven, J., 2004, Factors contributing to the summer 2003 heat wave, *Weather*, 59, 217-223.
- Campbell-Lendrum, D. H., Wilkinson, P., Kuhn, K., Kovats, R. S., Haines, A., Menne, B., and Parr, T.W., 2002, *Environmental Change, Climate and Health-issues and Research Methods*. Eds., P. Martens and A.J. McMichael. Cambridge University Press, 253-289.
- Cassardo, C., Meraliki, L., and Berro, D. C., 2007, Characteristics of the summer 2003 heat wave in Piedmont, Italy, and its effects on water resources, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 43(3), 195-221.
- Choi, B. C., Kim, J. Y., Lee, D. G., and Jan, K., 2007, Long-term trends of daily maximum and minimum temperatures for the major cities of South Korea and their implications on human health, *Atmosphere*, 17(2), 171-183 (in Korean).
- Choi, G. Y. and Kwon, W. T., 2005, Spatial-temporal patterns and recent changes of tropical night phenomenon in South Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 40(5), 730-747 (in Korean).
- Choi, K. Y., 2006, A definition of Korean heat waves and their spatio-temporal patterns, *Journal of the Korean Geographical Society*, 41(5), 527-544.
- Choi, K. Y., Choi, J. N., and Kwon, H. J., 2005, The impact of high apparent temperature on the increase of summertime disease-related mortality in Seoul: 1991-2000. *Journal of the Korean Society for preventive medicine*, 38(3), 283-290 (in Korean).
- Chu, P. S., 2002, Large-scale circulation features associated with decadal variations of tropical cyclone activity over the central North Pacific, *Journal of Climate*, 15, 2678-2689.
- Elsner, J. B., Jagger, T., and Niu, X. F., 2000, Changes in the rates of North Atlantic major hurricane activity during the 20th century, *Geophysical Research Letters*, 27, 1743-1746.
- Ferranti, L. and Viterbo, P., 2006, The European summer of 2003: Sensitivity to soil water initial conditions, *Journal of Climate*, 19, 3569-3680.
- Fink, A. H., Brucher, T., Kruger, A., Leckebusch, G.C., Pinto, J.G., and Ulbrich, U., 2004, The 2003 European summer heatwaves and drought-Synoptic diagnosis and impacts, *Weather*, 59,

- 209-215.
- Frich, P., Alexander, L. V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A. M. G., and Peterson, T., 2002, Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the 20th century, *Climate Research*, 19, 193-212.
- Fischer, E. M., Seneviratne, S. I., Luthi, D., and Schar, C., 2007, Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves, *Geophysical Research Letters*, 34, L06707, doi:10.1029/2006GL029068.
- Ha, K. J., Ha, E. H., Yoo, C. S., and Jeon, E. H., 2004, Temperature trends and extreme climate since 1909 at big four cities of Korea, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 40(1), 1-16 (in Korean).
- Heo, I. H. and Kwon, W. T., 2007, Temperature change of recent 10 years (1996-2005) in Korea, *Journal of Climate Research*, 2(2), 79-93 (in Korean).
- Heo, B. Y. and Song, J. W., 2012, Countermeasures on heat wave related disasters increasing due to climate change, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 12(6), 171-177 (in Korean).
- Ho, C. H., Baik, J. J., Kim, J. H., and Gong, D. Y., 2004, Interdecadal changes in summertime typhoon tracks, *Journal of Climate*, 17, 1767-1776.
- Hulme, M., Zhao, Z. C., and Jiang, T., 1994, Recent and future climate change in East Asia, *International Journal of Climatology*, 14, 637-658.
- Kalkstein, L. S., 1991, A new approach to evaluate the impact of climate on human mortality, *Environmental Health Perspectives*, 96, 145-150.
- Kalkstein, L. S., Jamason, P. F., Greene, J. S., Libby, J., and Robinson, L., 1996, The Philadelphia hot weather, health watch warning system: Development and application, summer 1995, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 1519-1528.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., and Joseph, D., 1996, The NCEP/ NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Kim, E. B., Park, J. K., and Jung, W. S., 2014, A study on the occurrence characteristics of tropical night day and extreme heat day in the metropolitan city, Korea, *Journal of Environmental Science International*, 23(5), 873-885 (in Korean).
- Kim, J., Lee, D. G., Park, I. S., Choi, B. C., and Kim, J. S., 2006, Influences of heat waves daily mortality in South Korea, *Atmosphere*, 16(4), 269-278 (in Korean).
- Kistler, R., Kalnay, E., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Kanamitsu, M., Kousky, V., van den Dool, H., Jenne, R., and Fiorino, M., 2001, The NCEP/ NCAR 50-year reanalysis, *Bulletin of American Meteorological Society*, 82, 247-267.
- Korea Claim Adjuster Association, 2011, A study on compensation standard criteria for outage damage, Research service report, Ministry of Trade, Industry.
- Kysely, J. and Huth, R., 2004, Heat-related mortality in the Czech Republic examined through synoptic and 'traditional' approaches, *Climate Research*, 25, 265-274.
- Lee, M. I. and Kang, I. S., 1997, Temperature variability and warming trend in Korea associated with global warming, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 33(3), 429-443 (in Korean).
- Michelozzi, P., de'Donato, F., Accetta, G., Forastiere, F., D'Ovidio, M., Perucci, C., and Kalkstein, L. S., 2004, Impact of heat waves on mortality. Rome,

- June 1-August 15, 2003, *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 53369-53371.
- Morberg, A. and Jones, P. D., 2005, Trends in indices for extremes of daily temperature and precipitation in Central and Western Europe 1901-1999, *International Journal of Climatology*, 25, 1149-1172.
- Park, C. Y., Choi, Y. E., Kwon, Y. A., Kwon, J. I., and Lee, H.S., 2013, Studies on changes and future projections of subtropical climate zones and extreme temperature events over South Korea using high resolution climate change scenario based on PRIDE model, *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, 19(4), 600-614 (in Korean).
- Park, J. K., Jung, W. S., and Kim, E. B., 2008a, A study on the influence of extreme heat on daily mortality, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(5), 523-537 (in Korean).
- Park, J. K., Jung, W. S., and Kim, E. B., 2008b, A study on development of the extreme heat standard in Korea, *Journal of the Environmental Sciences International*, 17(6), 657-669 (in Korean).
- Park, J. K., Jung, W. S., and Kim, E. B., 2009, Study on the establishment of threshold criteria for heat health watch warning system in Korea; Part I: establishment of criteria and verification, *Journal of the Environmental Sciences International*, 18(7), 767-780 (in Korean).
- Park, W. S. and Suh, M. S., 2011, Characteristics and trends of tropical night occurrence in South Korea for recent 50 years (1958-2007), *Atmosphere*, 21(4), 361-371 (in Korean).
- Pascal, M., Laaidi, K., Ledrans, M., Baffert, E., Caserio-Schonemann, C., Tertre, A.L., Manach, J., Medina, S., Rudant, J., and Empereur-Bissonnet, P., 2006, France's heat health watch warning system, *International Journal of Biometeorology*, 50(3), 144-153.
- Ross, T. and Lott, N., 2003, *A climatology of 1980-2003 extreme weather and climate events*, National Climatic Data Center Technical Report 2003-01. 14 pp.
- Roveson, S. M., 2004, Trends in time-varying percentiles of daily minimum and maximum temperature over North America, *Geophysical Research Letters*, 31, doi:10.1029/2003GL019019.
- Schar, C., Vidale, P. L., Luthi, D., Frei, C., Haberli, C., Liniger, M.A., and Appenzeller, C., 2004, The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves, *Nature*, 427, 332-336.
- Stott, P., Stone, D., and Allen, M., 2004, Human contribution to the European heatwave of 2003, *Nature*, 432, 610-614.
- Trigo, R. M., Garcia-Herrera, R., Diaz, J., Trigo, I. F., and Valente, M.A., 2005, How exceptional was the early August 2003 heatwave in France?, *Geophysical Research Letters*, 32, L10701, doi:10.1029/2005GL022410.
- UNEP, 2004, *Impacts of summer 2003 heat wave in Europe*, United Nations Environment Programme Early Warning and Emerging Environmental Threats Report. [Available online at <http://www.grid.unep.ch/product/publication/early-warning.php>]
- Wilks, D. S., 1995, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press, 467pp.
- WHO, 2003, *Heat waves: Impacts and responses*, WHO Regional Committee for Europe, 1-11.
- [http://www.emdat.be/result-disaster-profiles?disgroup=natural&dis_type=drought&period=1900\\$2015](http://www.emdat.be/result-disaster-profiles?disgroup=natural&dis_type=drought&period=1900$2015)

책임편집: 최광용

영문교열: 이은결